

## Helikopter pali aşınma kalkanındaki katı partikül erozyon davranışının incelenmesi

### Investigation of solid particle erosion behaviour on erosion shield of a helicopter rotor blade

Hasan GEDİKLİ<sup>1\*</sup>, İsmail ÖZEN<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.  
hgedikli@ktu.edu.tr, ismail.ozen@ktu.edu.tr,

Geliş Tarihi/Received: 20.09.2018, Kabul Tarihi/Accepted: 05.02.2019  
\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2019.82150  
Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Bu çalışmada, AISI 1020 çelik ve Ti-6Al-4V titanyum alaşım malzemelerinin katı partikül (parçacık) erozyon davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneyler ve sayısal simülasyonlar; farklı partikül çarpma hızları (100, 127, 170, 210, 250 m/s) ve açıları (20, 30, 45, 60, 90°) için gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, aynı malzemelerin bir helikopter pali aşınma kalkanındaki erozyon performansları, 0° hücum açısı ve 230 m/s çarpma hızı şartlarında MIL-STD-3033 standartına göre yapılmışken sayısal erozyon analizleri Eulerian-Lagrangian yaklaşımlı ayırık faz metodu ve ampirik erozyon eşitliği kullanan ticari ANSYS Fluent 15.0 paket programı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, sayısal sonuçlar deneysel veriyle iyi derecede uyumlu ve AISI 1020 çeliğinin kalkan yüzeyindeki erozyon performansı Ti-6Al-4V alaşım malzemesinden daha iyi elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Katı partikül erozyonu, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Helikopter pali, Aşınma kalkanı, AISI1020, Ti-6Al-4V

#### Abstract

In this paper, solid particle erosion behaviors of AISI 1020 steel and Ti-6Al-4V titanium alloy materials were experimentally and numerically investigated. Experiments and numerical simulations were carried out for the conditions of different particle impact velocities (100, 127, 170, 210, 250 m/s) and angles (20, 30, 45, 60, 90°). Moreover, erosion performances on the erosion shield of a helicopter rotor blade of aforementioned materials were numerically determined for the condition of angle of attack of 0° and impact velocity of 230 m/s. Numerical erosion analyzes were performed with ANSYS Fluent 15.0 package program using discrete phase method with Eulerian-Lagrangian approach and an empirical erosion equation while experimental erosion tests were conducted by MIL-STD-3033 standard. As a result, numerical results were in good agreement with the experimental data, and it was obtained that erosion performance on the shield surface of AISI 1020 steel material is better than Ti-6Al-4V titanium alloy material.

**Keywords:** Solid particle erosion, Computational fluid dynamics, Helicopter blade, Erosion shield, AISI1020, Ti-6Al-4V

## 1 Giriş

Otomotiv, havacılık ve uzay endüstrisi gibi alanlarda kullanılan makine parçaları yüksek hızlı hava akışıyla etkileşimli olduklarında hava içerisinde bulunan katı partiküllerin çarptıkları yüzeylerde meydana getirdikleri erozyon hasarı önemli derecede malzeme kaybına yol açmakta, parçaların çalışma performanslarını ve kullanım ömürlerini önemli derecede etkilemektedir. Özellikle, iniş ve kalkış esnasında yüksek çevresel hızda (230 m/s) dönen bir helikopter ana rotor palinin ön yüzeyine çarpan katı partiküller, palde önemli miktarda erozyon hasarına neden olmaktadır. Bu nedenle, helikopter ana rotor palinde meydana gelebilecek katı partikül erozyonunun önceden doğru bir şekilde tahmin edilmesi, palin çalışma performansı, kullanım ömrü, tamir ve bakım maliyetlerinin düşürülmesi açısından son derece önemlidir. Helikopter ana rotor palindeki katı partikül erozyonunun belirlenmesi, pal üzerindeki akışın fiziksel durum karmaşık olması, pal geometrisinin değişken eğriliği gibi faktörlerden dolayı günümüzde hala bir tartışma ve araştırma konusudur.

Hutchings, katı partikül erozyonunu bir akışkan içerisinde hareket eden katı partiküllerin bir yüzeye çarparak yüzeye meydana getirdiği malzeme kaybı olarak tanımlamıştır [10]. Finnie, bir akış ortamında bulunan katı partiküllerin çarptıkları yüzeylerde oluşturduğu erozyon hasarı; katı partikül ve hedef yüzeyin özellikleri (boyut, şekil, sertlik, yoğunluk, elastisite

modülü, akma gerilmesi vs...), partikül hızı, çarpma açısı gibi parametrelere bağlı olduğunu, sert malzemedeki erozyon hasarının çatlama, sünek malzemedeki erozyon hasarının ise kesme ve kazıma şeklinde meydana geldiğini ileri sürmüştür [7].

Değişken geometriye sahip parçaların yüzeyinde meydana gelen katı partikül erozyon hasarının deneysel olarak belirlenmesi çok zaman alıcı ve zahmetlidir. Günümüzde, bilgisayar teknolojilerindeki hızlı gelişmeler ve ilerlemelerle birlikte akış ortamıyla etkileşimde halinde olan değişken geometriye sahip katı partikül erozyon hasarını belirlemek için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinden (HAD) yararlanılmaktadır. Parsi ve diğ. ticari bir HAD yazılımı olan Fluent paket programını kullanarak bir boru içerisinde hareket eden akışkanla birlikte sürüklenen katı partiküllerin farklı eğim açılara sahip boru dirseği yüzeylerine çarparak neden oldukları katı partikül erozyon hasarını belirlemek için ampirik eşitliklere dayalı bir kod geliştirerek HAD erozyon analizleri gerçekleştirmişlerdir [19]. Analizlerde, Grant ve Tabakoff [9], Zhang ve diğ. [23], Oka ve diğ. [17], Neilson ve Gilchrist [16], DNV [6], Mansouri [12] tarafından birbirinden farklı malzemeler için geliştirilen ampirik erozyon eşitliklerini kullanarak elde etmiş oldukları erozyon sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Analiz sonuçlarına göre, deneysel sonuçlarla en iyi uyumu Mansouri [12] ampirik erozyon eşitliğinin sağladığını belirlemişlerdir. Shin, düşük irtifada

hareket eden bir helikopterin yüksek devirde dönen ana rotor pali yüzeyindeki katı partikül erozyon hasarını belirlemek için iki ve üç boyutlu HAD erozyon analizleri gerçekleştirilmiştir. İki ve üç boyutlu HAD analizlerinde, pal uzunluğu boyunca rotor göbeğinden itibaren pal ucuna doğru gidildikçe doğrusal olarak artan partikül çarpma hızına bağlı olarak katı partikül erozyon hasarının doğrusal olmayan şekilde arttığını belirlemiştir. Bunun yanında, helikopter rotor palindeki katı partikül erozyon hasarının palin çevresel hızına ve hücum açısına bağlı olarak değiştiğini tespit etmiştir [21]. Amezcuca ve diğ. 300 MW' (Megawatt)'lık bir buhar türbin içerisinden yüksek sıcaklıktaki yanmadan dolayı yüksek hızlı katı partikül çarpmasına maruz kalan lüle yüzeyindeki erozyon hasarını belirlemek için HAD erozyon analizleri gerçekleştirmişlerdir. Analizler sonucunda katı partiküllerin boyutlarındaki artışın lüle yüzeyinde meydana gelen erozyon hasarının azalmasına neden olduğunu belirlemiştir [1]. Özen ve Gedikli, 304 paslanmaz çelik, saf nikel, AL6061-T6 alüminyum alaşımı ve Ti-6AL-4V titanyum alaşımı malzemelerin katı partikül erozyon davranışını farklı çarpma hızları ve farklı çarpma açıları için deneysel ve sayısal olarak araştırdılar. Aynı malzemelerin bir helikopter rotor pali aşınma kalkanı üzerindeki katı partikül erozyon performanslarını farklı çarpma hızları ve farklı hücum açıları şartları altında sayısal olarak incelediler. Deneysel ve sayısal çalışma sonuçlarının birbirleriyle uyum içerisinde olduğunu ve HAD ile katı partikül erozyonunun başarılı bir şekilde modellenebileceğini ifade etmişlerdir [18].

Bu çalışmada, AISI 1020 çelik ve Ti-6Al-4V titanyum alaşım malzemelerinin katı partikül erozyon davranışları farklı partikül çarpma hızları (100, 127, 170, 210, 250 m/s) ve açıları (20, 30, 45, 60, 90°) için deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Ayrıca, aynı malzemelerin bir helikopter palinin aşınma kalkanı için erozyon performansları 0° hücum açısı ve 230 m/s çarpma hızı altında sayısal olarak belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır.

## 2 Deneysel yöntem

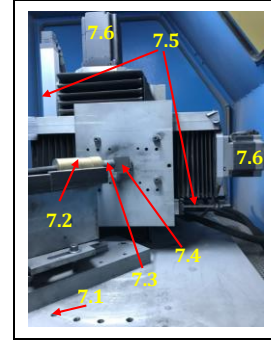
Helikopter palinin aşınma kalkanı yüzeyindeki katı partikül erozyon hasarını belirlemek için Şekil 1'de gösterilen katı partikül erozyon test sistemi kullanılmıştır. Bu erozyon test sisteminde; ASTM G76 [3], ASTM F1864 [4] ve MIL-STD-3033 [15] standartlarına göre deneyler yapılabilmektedir. Deney sistemi; 3.2 mm (1/8") boğaz ve 7.4 mm çıkış çapına sahip ve 500 µm boyutuna sahip katı partikülleri 300 m/s hıza kadar fırlatabilen bir yakınsak-ıraksak lüle, katı partiküllerin besleme debisini hassas bir şekilde  $\pm 0.2$  g/dk. olarak ayarlayabilen bir elektromanyetik besleyici, 40 bar seviyesine kadar basınç üreten bir kompresör, kompresör tarafından üretilen basınçlı havayı depolayan birincil ve ikincil tanklar, havanın istenilen basınçta sabit olarak kalmasını ve partiküllerin havayla karışmasını sağlayan bir basınç tankı, kontrol ünitesi ve test kabininden oluşmaktadır. Test kabini içerisinde lüle ile numune arasındaki mesafe 0-100 mm arasında, katı partikül çarpma açısı ise 10-90° arasında ayarlanabilmektedir. Bununla birlikte numune hareketli bir tabla üzerine konumlandırılmakta, tabla yatayda ve düşeyde adım motorları ile hareket ettirilebilmektedir. Erozyon test sisteminde katı partiküllerin hızları, çift disk yöntemi kullanılarak elde edilen basınç-hız kalibrasyon eğrisi ile belirlenmektedir.

Katı partikül erozyon deneyleri; partikül besleme debisi 2.5 g/dk. ortalama partikül boyutu 52 µm olan alümina tozlarının tek seferlik kullanımı, lüle ve numune yüzeyi arasındaki mesafe 10 mm olacak şekilde ayarlanarak 100 m/s

çarpma hızı ve farklı çarpma açıları (20, 30, 45, 60, 90°), 90° çarpma açısı ve farklı çarpma hızları (100, 127, 170, 210, 250 m/s) şartları altında gerçekleştirilmiştir. Şekil 2(a)'da gösterilen Alümina tozları (240 grid) için Malver Mastersizer cihazında boyut dağılımı ölçümü yapıldı ve ölçüm sonucu elde partikül boyut dağılımı Şekil 2(b)'de verilmiştir. Şekilden görülebileceği gibi alümina partikülleri için ortalama boyut yaklaşık 52 µm olarak elde edilmiştir.



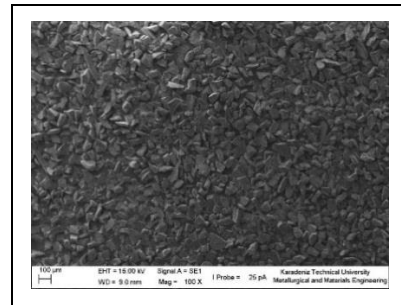
(a)



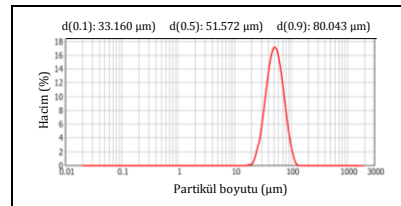
(b)

Katı partikül erozyon deney sistemi ve test kabini şu bileşenlerden oluşmaktadır. (1): Kompresör. (2): Birincil basınç tankı. (3): Nem alma ünitesi. (4): İkincil basınç tankı. (5): Kontrol ünitesi. (6): Elektro-manyetik partikül besleyici ve basınç tankı. (7): Test kabini. (7.1): Açık ayar deliği. (7.2): Lüle tutucu. (7.3): Lüle. (7.4): Numune. (7.5): Yatay ve dikey pozisyon sensörleri (7.6): Yatay ve dikey adım motorları. (8): Partikül hız ölçme sistemi.

Şekil 1(a): Katı partikül erozyon deney sistemi, b): Test kabini.



(a)



(b)

Şekil 2: Erozyon deneylerinde kullanılan. (a): Alümina tozları ve (b): Tozların boyut dağılımı.

Test numunelerinin boyutları çarpma açısına bağlı olarak 25x25 mm<sup>2</sup>'den 25x50 mm<sup>2</sup> olarak hazırlanmıştır. Deneylelerdeki erozyon hasarı, numunelerde meydana gelen kütle kaybı ölçümleri ile belirlenmiştir. Kütle kaybı ölçümleri her 4 dk.'da bir numune yüzeyi basınçlı hava ile temizlenerek ve toplamda 16 dk. süre için yapılmıştır. İlave olarak, hacimsel erozyon oranı; numunedeki kütle kaybının malzeme yoğunluğuna ve numuneye çarpan partiküllerin toplam kütlelerine bölünerek hesaplanmıştır.

### 3 Sayısal yöntem

Sayısal olarak gerçekleştirilen HAD erozyon analizi; akış ortamıyla ilgili denklemlerinin çözümü, partikül hareket denklemlerinin çözümü ve katı partiküllere maruz kalan hedef yüzeydeki erozyonun hesaplanmasından oluşmaktadır [2].

#### 3.1 Akış ortamıyla ilgili denklemlerin çözülmesi

Akış ortamındaki kontrol hacmiyle ilgili verilerin (basınç, hız, türbülans kinetik enerjisi vs.) hesabı için öncelikle kütle ve momentumla ilgili korunum denklemlerinin çözülmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu denklemlerin çözümü için türbülanslı akış ortamını hesaba katan Navier-Stokes eşitliklerinin çözülmesi gerekir. Mühendislik uygulamaları için genellikle kütle ve momentum korunum denklemlerinin çözümü için Navier-Stokes eşitliklerinin Reynolds ortalama formülleri kullanılır. Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemlerinin genelleştirilmiş halleri Eşitlik 1 ve 2'de verilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i U_j) \\ = -\frac{\partial P}{\partial x_i} \\ + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right. \\ \left. - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho u'_k u'_j) \end{aligned} \quad (2)$$

Reynolds ortalama Navier-Stokes eşitlikleri ile çözüm yapılırken küçük ölçekli türbülans dalgalanmalarının filtrelenmesi gerekir. Filtreleme sürecinde Reynolds gerilmeleri olarak adlandırılan bilinmeyen değişkenler ortaya çıktığı için bu bilinmeyen değişkenlerin çözümü için kapalı eşitliklere ihtiyaç duyulmaktadır. Kapalı eşitlikler olarak FLUENT programında değişik türbülans modelleri yer almaktadır. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında katı partikül erozyonunun HAD ile analizleri yapılırken genellikle en iyi yakınsama ve hassas sonuçlar vermesi nedeniyle  $k - \omega$  SST türbülans modeli tercih edilmektedir [11],[21]. Bu çalışmada, Eşitlik 3 ve 4'te kapalı eşitlikleri verilen  $k - \omega$  SST türbülans modeli HAD analizleri için kullanılmıştır [14].

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = \tilde{P}_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \omega)}{\partial x_i} = \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 \\ + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] \\ + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (4)$$

#### 3.2 Partikül hareket denklemlerinin çözülmesi

Akışkan içerisinde hareket eden katı partiküllerin hızının ve yörüngesinin belirlenmesi için Euler-Lagrangian yaklaşımıyla ayrık faz yöntemi kullanılmaktadır [8]. Ayrık faz yöntemiyle ilgili ANSYS\_Fluent programında çözümleri yapılan Newton'un hareket denklemleri aşağıda verilmiştir:

$$\frac{dV_p}{dt} = F_D(U - V_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F \quad (5)$$

Bu denklemlerde  $\rho_p$ ,  $\rho_p$ ,  $d_p$  sırasıyla partikül hızı, yoğunluğu ve ortalama çapını temsil etmektedir.  $F_D$ , partikülün birim kütlesi başına sürükleme kuvvetini,  $g$ , akışkan hızını;  $F$ , akışkan yoğunluğunu,  $g$  yer çekimi ivmesini,  $F$  ise yer çekimi, kaldırma, basınç gibi diğer birim kütle kuvvetlerini temsil etmektedir.

#### 3.3 Hedef yüzeydeki erozyonun hesaplanması

Akış ortamı içerisinde katı partikül çarpmasına maruz kalan hedef yüzeyde meydana gelen erozyonun hesabı için literatürde deneysel sonuçlara dayalı geliştirilen çok sayıda ampirik eşitlik mevcuttur. HAD erozyon analizlerinde hedef yüzeydeki erozyon hasarı temel olarak; hedef yüzey ve partikül malzemesi, partikül boyutu ve geometrisi, partikül çarpma açısı ve hızı gibi parametrelere bağlıdır. DNV (Det Norske Veritas) firması tarafından geliştirilen ve Eşitlik 6'da verilen hacimsel erozyon oranı ( $e_r$ ) eşitliği yukarıda ifade edilen parametreleri üç parametreye ( $K$ ,  $n$ ,  $F(\theta)$ ) indirgeyerek bir basitleştirme yapmaktadır [5].

$$e_r = \frac{K \cdot V_p^n \cdot F(\theta)}{\rho_w} \quad (6)$$

Burada,  $K$  ve  $n$  erozyon sabitleriyken,  $V_p$ , partikül çarpma hızı [m/s],  $\rho_w$ , hedef yüzey malzemesinin yoğunluğu [kg/m<sup>3</sup>] ve  $F(\theta)$ , erozyonun çarpma açısına göre parçalı doğrusal polinom özellikli bir fonksiyonu temsil etmektedir.  $K$ ,  $n$  ve  $F(\theta)$  parametreleri, AISI 1020 ve Ti-6Al-4V alaşımı malzemeleri için farklı çarpma hızları ve açılarında yapılan katı partikül erozyon deneylerinden belirlenmiştir [5]. Elde edilen  $K$  ve  $n$  sabitleri Tablo 1'de ve  $F(\theta)$  fonksiyonu sabitleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1: AISI 1020 çeliği ve Ti-6Al-4V alaşımı için hesaplanan  $K$  ve  $n$  sabitleri.

Malzeme sabiti	Hedef Yüzey Malzemesi	
	AISI 1020	Ti-6Al-4V
n	2.187	2.308
K	4.021x 10 <sup>-8</sup>	1.689 x 10 <sup>-8</sup>

Tablo 2: AISI 1020 çeliği ve Ti-6Al-4V alaşımı için hesaplanan  $F(\theta)$  sabitleri.

Çarpma Açısı (°)	Hedef Yüzey Malzemesi	
	AISI 1020	Ti-6Al-4V
20	0.837	1.025
30	1.021	0.788
45	0.871	0.701
60	0.724	0.559
90	0.503	0.488

HAD erozyon analizlerinde, partiküller hedef yüzeye çarptıktan sonra yüzeyi terk etme yönü ve hızlarının hesabı için Taslim ve diğ. tarafından önerilen geri tepme modeli kullanılmıştır [22].

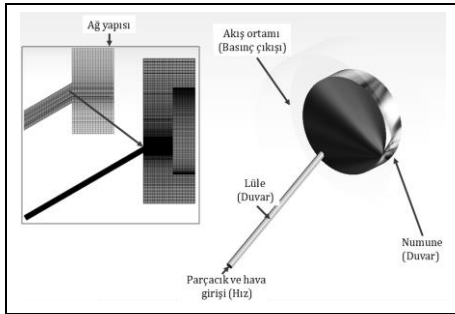
İlave olarak, hedef yüzeye çarpan partiküllerin meydana getirdiği erozyonun hızın hesabı için Eşitlik 7'de verilen ve Mansouri ve diğ. tarafından önerilen eşitlik kullanılmıştır [13].

$$h_i = \frac{(e_r)_i \cdot \dot{m}_i}{\rho_w A_i} \quad (7)$$

Burada,  $h_i$  [m/s] ve  $(e_r)_i$  [kg/kg] sırasıyla hedef yüzeydeki i. hücre elemanı için yerel erozyon hızı ve kütleli erozyon oranını temsil etmektedir.  $\rho_w$  [kg/m<sup>3</sup>], hedef yüzey malzemesinin yoğunluğu,  $A_i$  [m<sup>2</sup>], hedef yüzeydeki i. hücre elemanının yüzey alanı,  $\dot{m}$  [kg/s], partiküllerin hedef yüzeyin i. hücre elemanındaki birikme hızı olarak ifade edilmektedir.

### 3.4 HAD erozyon modelinin doğrulanması

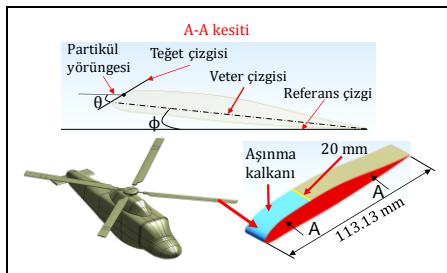
HAD erozyon modelinin doğruluğunu sağlamak için deneysel erozyon sonuçlarıyla bir karşılaştırma yapılmıştır. Sayısal erozyon analizleri için ağ bağımsız simülasyonlar gerçekleştirilmiş, iyi yakınsama ve düzgün erozyon dağılımı için Şekil 3'teki ağ yapısı kullanılmıştır. Modelde, ortalama 52 µm çap ve farklı çarpma hızlarına sahip Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Alumina) katı partiküllere, 7.4 mm çapa sahip borunun giriş tarafında partikül ve hava giriş sınır şartı verilmiştir. Analizlerde deneysel sonucu sağlayan bir milyon düğüm noktalı ve 800 bin adet altı köşeli elemanlar kullanılmış olup, lüle yüzeyine yakın olan yerlerde hassas ağ yapısı kullanılmıştır. HAD doğrulama modeliyle ilgili analizler Ti-6Al-4V malzemesi için 100 m/s çarpma hızında farklı çarpma açıları ( $\theta=20, 30, 45, 60, 90^\circ$ ) ve  $90^\circ$  çarpma açısında farklı çarpma hızları ( $V_p = 100, 127, 170, 210, 250$  m/s) için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3: HAD doğrulama modeli ve ağ yapısı.

### 3.5 Aşınma kalkanındaki erozyonun belirlenmesi

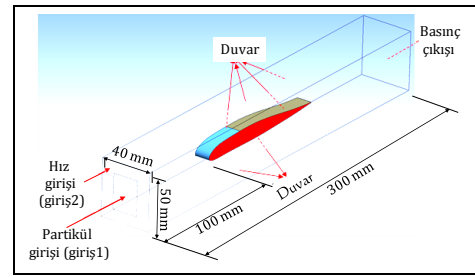
Değişken eğrili geometriye sahip helikopter pali aşınma kalkanındaki katı partikül erozyon performansını belirlemek için kullanılan palin geometrik boyutlarının verileri Rodriguez [20] tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır (Şekil 4).



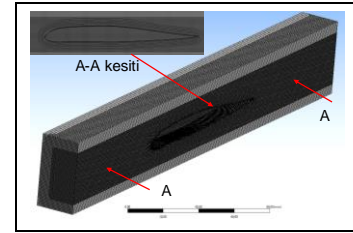
Şekil 4: Helikopter rotor pal geometrisi [20].

Analiz süresini azaltmak için pal'in 20 mm' lik dilimi kullanılarak erozyon simülasyonları gerçekleştirilmiştir. AISI 1020 çeliği ve Ti-6Al-4V alaşım malzemelerinin pal aşınma kalkanındaki erozyon performansı  $0^\circ$  pal hücum açısı ( $\theta$ ), 50 µm partikül ortalama çapı ve 230 m/s partikül çarpma hızı şartları altında yapılan sayısal analizlerle belirlenmiştir.

Helikopter pali aşınma kalkanı HAD erozyon modeli için oluşturulan sınır şartları ve ağ yapısı Şekil 5'te verilmiştir. Analiz süresini azaltmak için modelde katı partiküllerin giriş yaptığı yüzey 25x35 mm<sup>2</sup> boyutlarında ayrı olarak tanımlanmış olup katı partiküllerin hızı yüzeye normal yönde hava ile aynı hıza sahip olacak şekilde seçilmiştir. Partiküller, yüzeye homojen dağılımlı olarak dakikada 5.8 g/cm<sup>2</sup> giriş debisinde ve 230 m/s hızda girecek şekilde şartlandırılmıştır. Modeldeki pal etrafında yapılandırılmış elemanlarla birlikte eleman sayısından bağımsız çözüm sağlayacak şekilde toplamda 2.1 milyon altı köşeli eleman kullanılmıştır.



(a)



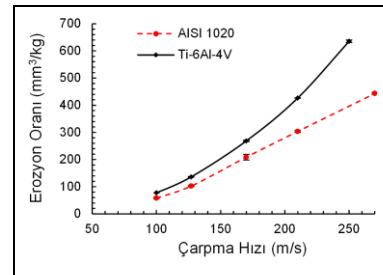
(b)

Şekil 5: Helikopter pali aşınma kalkanı için sonlu hacimler erozyon modeli: a) Sınır şartları ve b) Ağ yapısı

## 4 Bulgular ve irdeleme

### 4.1 Malzemelerin katı partikül erozyon davranışı

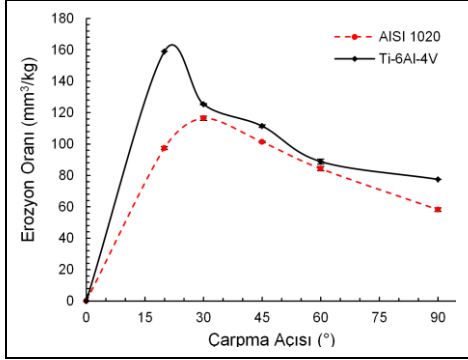
AISI 1020 çeliği ve Ti-6Al-4V alaşım malzemelerinin partikül çarpma hızına göre erozyon davranışlarının değişimleri Şekil 6'da verilmiştir. Her iki malzeme için erozyon değişimleri, partikül çarpma hızının artmasına bağlı olarak doğrusal olmayan bir şekilde artmıştır. Yüksek çarpma hızlarında, AISI 1020 çeliğinin hacimsel erozyon performansı Ti-6Al-4V alaşım malzemesinden daha iyi elde edilmiştir.



Şekil 6: Çarpma hızına göre malzemelerin erozyon değişimleri ( $\theta=90^\circ$ ).

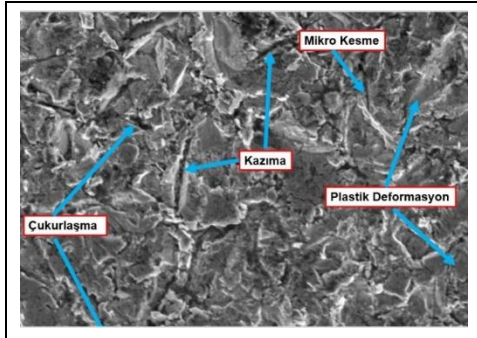


Şekil 7’de ise AISI 1020 çeliği ve Ti-6Al-4V alaşım malzemelerinin partikül çarpma açısına göre erozyon değişimleri verilmiştir. AISI 1020 çeliği 30° çarpma açısında, Ti-6Al-4V titanyum alaşımı 20° çarpma açısında en kötü erozyon performansı sergilemiştir. Malzemeler en kötü erozyon performansı sergiledikleri çarpma açısından (20-30°) sonra literatürle uyumlu olarak 90° çarpma açısına kadar daha iyi erozyon performansı sergilemişlerdir [7].

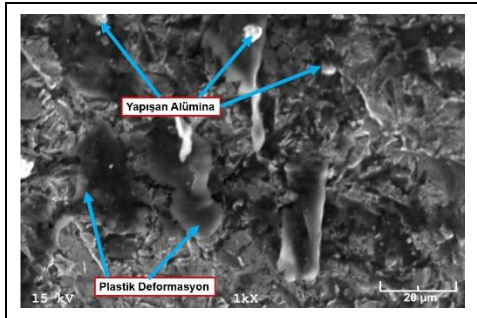


Şekil 7: Çarpma açısına göre malzemelerin erozyon değişimleri ( $V_p=100$  m/s).

Şekil 8’ de erozyon testleri sonucunda erozyon numunesinin metalografi mikroskobu ve tarama elektron mikroskobu altında incelenmesi sonucunda numune yüzeyinde elde edilen hasar mekanizmaları gösterilmiştir. Şekil 8(a)’dan da görüleceği üzere numune yüzeyinde oluşan hasar mekanizmaları kazıma, çukurlaşma, mikro kesme ve plastik deformasyon olarak elde edilmiştir. Şekil 8(b)’de numune yüzeyine yapışan partiküllerin numune yüzeyinde oluşturduğu plastik deformasyon hasarları detaylı olarak görülebilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 8: Erozyon testi sonrası numune yüzeyinde oluşan erozyon hasar mekanizmaları. (a): Krater merkezi ve (b): aşınma bölgesi kenarı.

## 4.2 Sayısal modelin doğrulanması

Çarpma hızına bağlı olarak AISI 1020 çeliği ve Ti-6Al-4V titanyum alaşım numunelerinde elde edilen deneysel ve sayısal erozyon değerlerinin karşılaştırması Tablo 3’te verilmiştir. Tablo 3’ten de anlaşılacağı üzere tüm çarpma hızları için deneysel ve sayısal erozyon değerleri birbirleriyle uyum içerisinde elde edilmiştir.

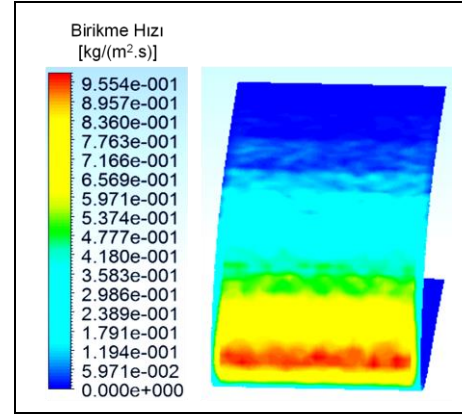
Tablo 3: AISI 1020 çeliği ve Ti-6Al-4V alaşımı için deneysel ve sayısal erozyon sonuçlarının karşılaştırması.

Çarpma Hızı (m/s)	Erozyon Oranı (mg/g)					
	AISI 1020			Ti-6Al-4V		
	Deneysel	Sayısal	% Hata	Deneysel	Sayısal	% Hata
100	0.451	0.470	4.213	0.341	0.340	0.293
127	0.797	0.800	0.376	0.600	0.590	1.667
170	1.629	1.510	7.305	1.160	1.159	0.086
210	2.368	2.400	1.351	1.870	1.887	0.909
250	3.456	3.520	1.852	2.810	2.823	0.463

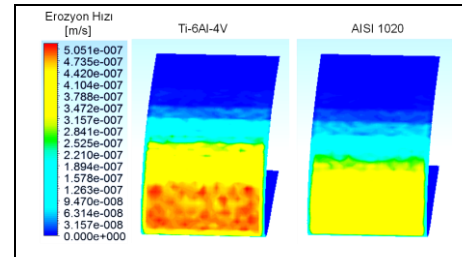
AISI 1020 çeliği için deneysel ve sayısal erozyon değerleri arasındaki hata, 100 m/s çarpma hızında % 4.213 ve 170 m/s çarpma hızında % 7.305 olarak elde edilmişken Ti-6Al-4V titanyum alaşımı için 100 m/s ve 170 m/s çarpma hızlarında deneysel ve sayısal erozyon verileri arasındaki hata çok düşük seviyelerde elde edilmiştir.

## 4.3 Malzemelerin helikopter pali aşınma kalkanı yüzeyindeki katı partikül erozyon performansları

AISI 1020 çeliği ve Ti-6Al-4V alaşım malzemelerinden oluşan helikopter pali aşınma kalkanı için 230 m/s partikül çarpma hızına sahip partiküllerin kalkan yüzeyindeki birikme hızları ve yüzeydeki erozyon hızı değişimleri Şekil 9’da üç boyutlu olarak verilmiştir. Şekil 9(a)’da görüleceği üzere partiküllerin birikme hızının yüksek olduğu yerlerde erozyon hızı değerleri daha yüksek elde edilmiştir Şekil 9(b).



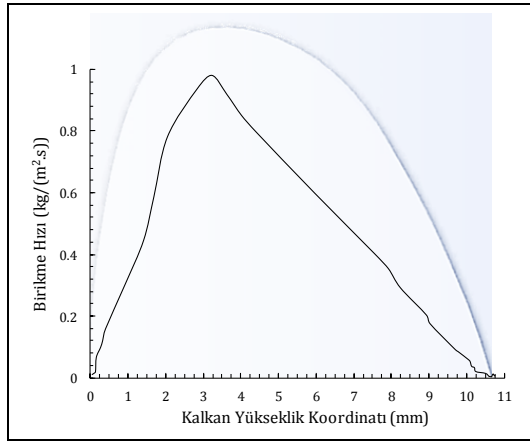
(a)



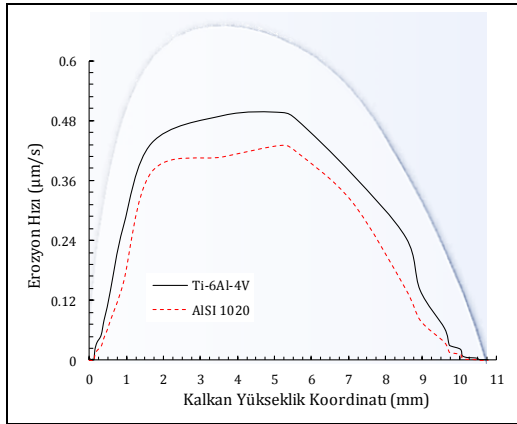
(b)

Şekil 9: Aşınma kalkanı yüzeyi boyunca. (a): Partikül birikme hızı ve (b): Erozyon hızı dağılımları.

Şekil 10(a) ve 10(b)'de AISI 1020 çeliği ve Ti-6Al-4V alaşım malzemelerinden oluşan aşınma kalkanı boyunca 230 m/s çarpma hızı için partiküllerin yüzeyde birikme hızı ve yüzeydeki erozyon hızı dağılımları iki boyutlu olarak gösterilmiştir. Pal burun bölgesindeki akışın fiziksel durumundan dolayı partiküllerin birikme hızı yüksek seviyelerde olduğu için Şekil 10(a) bu bölgede partiküllerin çarpma açısı 90° civarında olmasına rağmen erozyon hızı değerleri yüksek elde edilmiştir Şekil 10(b). Pal aşınma kalkanının diğer bölgelerinde partiküllerin birikme hızı ve çarpma açılarına bağlı olarak erozyon hızı değerlerinde artma veya azalma olmuştur. Pal aşınma kalkanı boyunca AISI 1020 çeliği Ti-6Al-4V titanyum alaşımına göre daha iyi erozyon performansı göstermiştir.



(a)

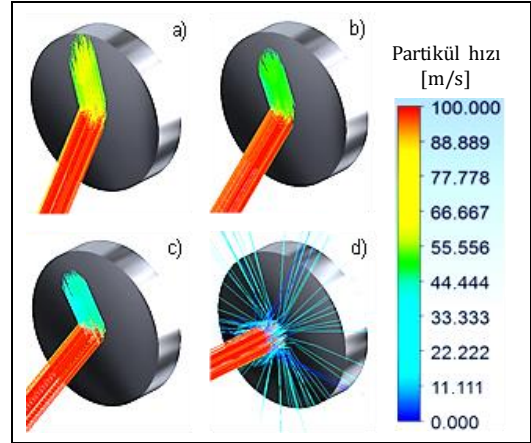


(b)

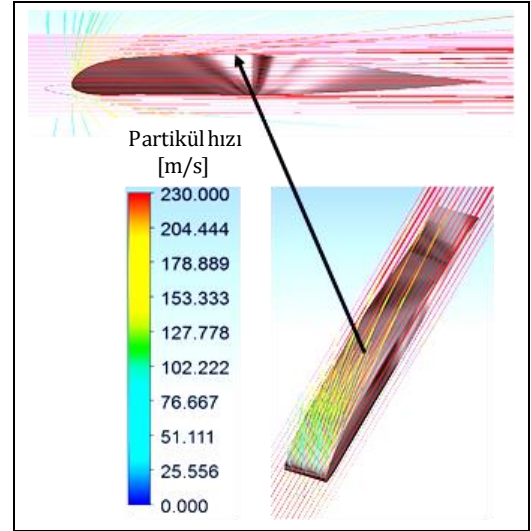
Şekil 10: Aşınma kalkanı profili boyunca. (a): Partiküllerin yüzeyde birikme hızı ve (b): Erozyon hızı dağılımı.

HAD erozyon doğrulama modelindeki numune ve pal aşınma kalkanı yüzeyleri üzerindeki partiküllerin çarptıktan sonraki hız ve yörünge dağılımları sırasıyla Şekil 11 ve 12'de gösterilmiştir.

Şekil 11'den görülebileceği gibi 90°'lik çarpma açısında partiküller numune yüzeyinden geriye doğru yansırken diğer çarpma açılarında yüzeyle partiküller arasındaki çarpma açısına bağlı olarak partiküller farklı yönlerde doğru hareket ederek numune yüzeyinden uzaklaşmışlardır. Buna karşın, pal aşınma kalkanı yüzeyine çarpan partiküllerin hızları ve yörüngeleri aşınma kalkanı geometrisine bağlı olarak önemli derecede değişim göstermiştir (Şekil 12).



Şekil 11: HAD erozyon modelinde çarpma açısına göre numune yüzeyine çarpan partiküllerin hız ve yörünge dağılımları. (a): 30°, (b): 45°, (c): 60°, (d): 90°.



Şekil 12: Helikopter rotor pali aşınma kalkanı yüzeyine çarpan partiküllerin iki ve üç boyutlu hız ve yörünge dağılımları.

## 5 Sonuçlar

Bu çalışmada, AISI 1020 çeliği ve Ti-6Al-4V titanyum alaşımı malzemelerinin katı partikül erozyon davranışları farklı çarpma hızları ve açıları şartları altında deneysel ve sayısal olarak belirlenmiştir. İlave olarak, bahsi geçen malzemelerin bir helikopter rotor palinin aşınma kalkanındaki erozyon performansları 230 m/s çarpma hızı ve 0° hücum açısı şartları altında sayısal olarak belirlenmiştir. Gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışmalar ışığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Katı partikül erozyon davranışı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak başarılı bir şekilde modellenilebilmektedir,
2. Helikopter aşınma kalkanında AISI 1020 çeliği, Ti-6Al-4V titanyum alaşımına göre daha iyi erozyon performansı göstermektedir,
3. Ti-6Al-4V titanyum alaşımı ve AISI 1020 çeliği çarpma açısı 20°-30° arasında en kötü erozyon davranışı sergilemektedir,
4. Erozyon oranı, katı partikül çarpma hızındaki artışa bağlı olarak önemli derecede artmaktadır.

## 6 Kaynaklar

- [1] Amezcua AC, Munoz AG, Romero CA, Czerwiec ZM, Amezcua RC. "Numerical investigation of the solid particle erosion rate in a steam turbine nozzle". *Applied Thermal Engineering*, 27(14-15), 2394-2403, 2007.
- [2] Arabnejad H, Mansouri A, Shirazi S A, McLaury BS. "Development of mechanistic erosion equation for solid particles". *Wear*, 332-333 (1), 1044-1050, 2015.
- [3] ASTM International. "Standard test method for conducting erosion tests by solid particle impingement using gas jets". Scientific Report, G 76-04, Pennsylvania, USA 2004.
- [4] ASTM International. "Standard test method for dust erosion resistance of optical and infrared transparent materials and coatings". Scientific Report, F1864 - 05, Pennsylvania, USA 2010.
- [5] Budur Aİ. Katı Parçacıkların Metalik Yüzeylerde Oluşturduğu Erozyonun Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2018.
- [6] Det Norske Veritas. "Erosive wear in piping systems". *Scientific Report, R0501*, Høvik, Norway, 2011.
- [7] Finnie I. "Erosion of surfaces by solid particles". *Wear*, 3 (1), 87-103, 1960.
- [8] ANSYS Fluent 12.0 User's Guide. ANSYS Inc, Canonsburg, USA, 2009.
- [9] Grant G, Tabakoff, W. "Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles". *Journal Aircraft* 12 (5), 471-478, 1975.
- [10] Hutchings IM, Winter RE, Field JE. "Solid particle erosion of metals: the removal of surface material by spherical projectiles". *Proceedings of the Royal Society*. 348(1), 379-392, 1976.
- [11] Kim JH, Joo HG, Lee KY. "Simulation of solid particle erosion in WC-Ni coated wall using CFD". *Journal of Materials Processing Technology*, 224 (1), 240-245, 2015.
- [12] Mansouri A, Arabnejad H, Karimi S, Shirazi S, McLaury B "Improved CFD modeling and validation of erosion damage due to fine sand particles". *Wear*, (1), 339-350, 2015.
- [13] Mansouri A, Arabnejad H, Shirazi S, McLaury B. "A combined CFD/experimental methodology for erosion prediction". *Wear*, 332-333 (1), 1090-1097, 2015.
- [14] Menter FR, Kuntz M, Langtry R. "Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. Turbulence". *Heat and Mass Transfer* 4, Begell House, 3, 2003. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.460.2814&rep=rep1&type=pdf> (15.08.2018)
- [15] Military Standart. "Particle/sand Erosion Testing of Rotor Blade Protective Materials". Scientific Report, MIL-STD-3033, Virginia, USA, 2010.
- [16] Neilson JH, Gilchrist A. "Erosion by a stream of solid particles". *Wear*, 11(2), 111-122, 1968.
- [17] Oka YI, Okamura K, Yoshida T. "Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: effects of impact parameters on a predictive equation." *Wear*, 259(1-6), 95-101, 2005.
- [18] Özen, İ ve Gedikli, H. "Solid particle erosion on shield surface of a helicopter rotor blade using computational fluid dynamics". *Journal of Aerospace Engineering*, 32(1), 1-14, 2019.
- [19] Parsi M, Agrawal M, Srinivasan V, Vieira RE, Torres CF, Brenton S, McLauryd SB, Shirazi SA. "CFD simulation of sand particle erosion in gas-dominant multiphase flow". *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 27, 706-718, 2015.
- [20] Rodriguez C. "CFD analysis on the main-rotor blade of a scale helicopter model using overset Meshing". MSc Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2012.
- [21] Shin BG. "Prediction of Sand Particle Trajectories And Sand Erosion Damage On Helicopter Rotor Blades". PhD Thesis, The Pennsylvania State University, Pennsylvania, USA, 2010.
- [22] Taslim ME, Khanicheh A, Spring S. "A numerical study of sand separation applicable to engine inlet particle separator systems". *Journal of The American Helicopter Society*, 54 (4), 42001-420010, 2009.
- [23] Zhang Y, Reuterfors EP, McLaury BS, Shirazi SA, Rybicki ER. "Comparison of computed and measured particle velocities and erosion in water and air flows". *Wear*, 263(1-6), 330-338, 2007.